

EVOLUTION DES DEBITS LIQUIDES ET SOLIDES DU BOUREGREG

Gil MAHE¹, Hamid BENABDELFADEL², Claudine DIEULIN¹, Meryem ELBARAKA¹, Mohamed EZZAOUINI³, Kenza KHOMSI⁴, Nathalie ROUCHE¹, Mohamed SINAN⁵, Maria SNOUSSI⁶, Armand TRA BI⁷, Abdelaziz ZEROUALI³

Résumé

Au Maroc l'Oued Bouregreg draine le ruissellement du centre nord du pays depuis le Moyen Atlas vers l'Atlantique. Ses eaux sont stockées dans la retenue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah en amont de Rabat, pour desservir en eau douce un bassin de population de près de 8 millions d'habitants jusqu'à Casablanca. Depuis la création du barrage en 1974 la population a beaucoup augmenté et les pluies ont diminué à partir de 1979. Ceci a entraîné la surélévation de la digue pour augmenter la capacité de la retenue du barrage en 2006. Un second souci est le comblement de la retenue par les sédiments, phénomène d'ampleur modérée sur le Bouregreg, mais qui mérite d'être quantifié dans un environnement socio-économique et climatique changeant. Les résultats présentés ici concernent l'évolution des pluies, des débits et des transports solides. Ils ont été obtenus dans le cadre du programme SIGMED (approche spatialisée de l'impact des activités agricoles sur les transports solides et les ressources en eau de grands bassins versants), financé par l'AUF et l'IRD.

Mots clés : Bouregreg ; Maroc ; SIGMED ; sédiments ; barrage ; pluie ; débit

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet SIGMED, qui propose une approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau De grands bassins versants (Mahé *et al.*, 2013a), l'oued Bouregreg a été choisi pour développer l'étude pluri-disciplinaire au Maroc. Le Bouregreg est l'un des cinq grands fleuves marocains par le débit et la taille, il présente la particularité d'être barré à 18 km de son embouchure par le très grand barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, de plus d'un milliard de m³, qui dessert les deux plus grandes agglomérations du Maroc Rabat-Salé et Casablanca pour un bassin de population de plus de 8 millions d'habitants. Il est indispensable de connaître l'évolution des ressources en eau disponibles pour ce barrage, dans un environnement climatique changeant. De plus, dans un contexte méditerranéen semi-aride (Driouech *et al.*, 2010) depuis la baisse des pluies de 1979 (Singla *et al.*, 2010), et une augmentation des événements extrêmes (Khomsni *et al.*, 2012), les conditions de l'érosion et du transport solide ont été modifiées. Les premiers résultats du programme SIGMED ont clairement montré également l'impact des activités humaines sur l'environnement et les conditions d'érosion (Mahé *et al.*, 2013b ; Laouina *et al.*, 2010) mais il reste pour le moment difficile de quantifier les parts anthropiques et climatiques des modifications récentes des dynamiques érosives sur le bassin. Cette étude présente

¹ HydroSciences Montpellier, France, [Contact : gil.mahe@ird.fr](mailto:gil.mahe@ird.fr)

² Direction de la recherche et de la Planification de l'Eau, Rabat, Maroc

³ Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia, Ben Slimane, Maroc

⁴ Météorologie Nationale, Casablanca, Maroc

⁵ Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca, Maroc

⁶ Université Mohammed V, Rabat, Maroc

⁷ Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

l'évolution des pluies et débits sur le bassin du Bouregreg, ainsi que des données sur les transports de sédiments. La partie hydrologique concerne une étude des pluies et des débits liquides sur le bassin aux stations disponibles fournies par la DRPE et l'ABHBC pour ce qui est des débits, et par la Météorologie Nationale pour les pluies. Les transports solides de matières en suspensions sont estimés à partir de mesures ponctuelles effectuées par les services hydrologiques marocains au début et à la fin des années 70 et au début des années 80. Le comblement de la retenue du barrage SMBA est estimé à partir des résultats de mesures bathymétriques fournies par l'ABHBC entre 1980 et 2010, réalisées par une entreprise privée qui travaille sous contrat avec l'Agence.

SITUATION DU BASSIN ET DONNEES DISPONIBLES

Le Bouregreg est l'un des principaux fleuves du Maroc. Il prend naissance dans le massif du Moyen Atlas à l'altitude de 1 627 mètres au niveau du Jebel Mtourzgane et de Grou, et se jette dans l'océan Atlantique à l'embouchure séparant les villes de Salé au nord et Rabat au sud, après avoir cheminé vers le littoral atlantique à travers la Meseta (Beaudet, 1969). Son bassin versant est limité au nord-est par le bassin de Sebou, au sud par celui de l'Oum Er Rbia, au sud-ouest par les bassins des oueds côtiers (oued Cherrat, oued N'Fifikh, et oued Malleh), et s'ouvre vers l'ouest sur l'océan Atlantique.

Le réseau hydrographique du bassin s'articule autour de deux principales rivières, l'oued Bouregreg et l'oued Grou, qui drainent respectivement une superficie de 4000 km² et de 3600 km² (figure 1). En plus de ces deux cours d'eau majeurs, se rajoutent l'oued Korifla de 1900 km² et l'oued Akrech de 150 km², deux affluents de l'oued Grou.

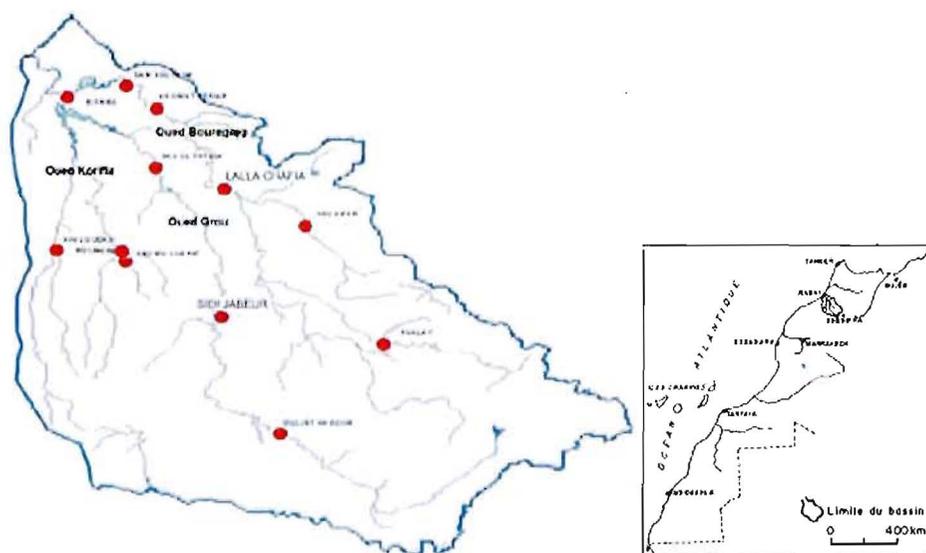


Fig.1 : Localisation des principaux cours d'eau du bassin de Bouregreg

L'oued Bouregreg correspond à la partie nord-est du bassin. Son chenal suit une direction globale rectiligne orientée SE-NW et s'étend sur une longueur de 240 Km, SIGMED (2010). Il prend naissance dans le massif du Moyen Atlas à une altitude de 1627 m environ, (Beaudet, 1969). Les 23 derniers kilomètres de cours inférieur du Bouregreg constituent un estuaire. Son débit moyen s'élève à 23 m³/s mais peut atteindre 1 500 m³/s en période de crue

(SIGMED). Il reçoit, le long de son parcours près de Ras Ennouala à 25 km de l'océan atlantique, l'oued Grou et, à 18 km de l'aval de sa confluence l'oued Akrech caractérisé par un régime variable et un débit très faible.

Depuis 1974, le cours de la rivière de Bouregreg a été modifié par le Barrage de Sidi Mohammed ben Abdellah. A 18 km de l'embouchure, le barrage constitue le principal dispositif existant en matière de mobilisation des eaux de surface du bassin. Il est alimenté par les oueds : Bouregreg, Grou et Korifla (Figure 2). Il assure l'alimentation en eau potable de toute la région de Rabat, de Salé et de Casablanca. Le barrage est d'une hauteur de 97,5m. Depuis sa création, sa capacité en eau était de 446 millions de m³, mais, après les travaux de surélévation du barrage en 2006 (Figure 3), celle-ci est passée à 1025 millions de m³. Cette surélévation a également permis de porter la hauteur du barrage de 97,5 à 105 m (d'après le site du ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement). Comme tous les barrages situés en Afrique du nord, le barrage SMBA connaît d'énormes problèmes d'envasement qui sont estimés de l'ordre de 2,5 Mm³/an, ce qui correspond à une dégradation spécifique annuelle de 370t/km²/an (Lahlou, 1986). Le bassin contient également sept barrages collinaires : Aird, Ait Lamrabtia, Bouknadel, Mahrouk et N'khila à El Khémisset, Ain Tourtoute, et Tskrame à Khénifra.

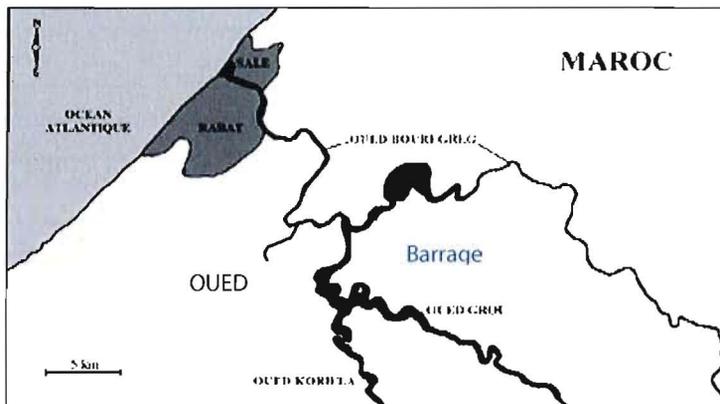


Fig.2 : Le barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah et les principaux oueds affluents

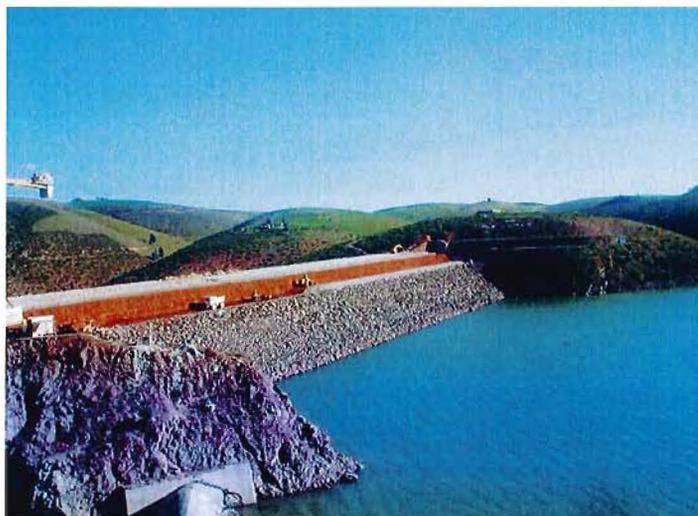


Fig.3 : Photo des travaux de surélévation du barrage SMBA (2006), source : ABHBC (Rabat, Maroc)

Au total, 10 stations hydrologiques dont une automatique et six autres équipées de postes d'annonce de crues, permettent de contrôler les écoulements de surface, générés au niveau du bassin du Bouregreg et de ses affluents. Ces écoulements, de régime intermittent, sont caractérisés par une grande variabilité aussi bien dans le temps que dans l'espace.

Le climat du bassin est du type semi aride, subissant les effets de l'altitude, de l'extension en latitude et de son ouverture sur la façade atlantique.

La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 760 mm au poste d'Oulmès, contre 450 mm à Rabat, et un minimum vers 350 mm dans le sud du bassin. La saison pluvieuse s'étend d'octobre à avril, pendant laquelle la quasi – totalité des épisodes pluvieux sont observés et qui produisent une pluviométrie cumulée de l'ordre de 90% de la pluviométrie annuelle. La saison sèche quant à elle s'étend du mois de Mai à Septembre et se distingue par la rareté des pluies qui ne dépassent guère 10 % de la pluie annuelle.

Les températures moyennes annuelles oscillent au niveau du bassin entre 15° et 18° C sur la côte et 15° et 17° en zone de montagne. Des maxima supérieurs à 45° par vent de Chergui sont parfois observés.

Le contexte hydrogéologique défavorable du bassin du Bouregreg, constitué essentiellement de formations géologiques imperméables d'âge primaire, est à l'origine de l'absence de nappes d'eau souterraines potentielles.

Les formations géologiques de type cristallines ou métamorphiques ne donnent qu'une faible charge dissoute et en suspension, mais il y a de larges étendues schisteuses fournissant des suspensions, en plus des altérations et colluvions qui fournissent des apports importants, ce qui n'exclut pas des problèmes d'érosion marqués surtout dans les zones d'accumulations alluviales et dans la partie aval du bassin à sédiments néogènes.

Selon le recensement de 1994, le bassin du Bouregreg compte une population de l'ordre de 1.985.000 habitants, dont 21% sont des ruraux, soit environ 424.000 habitants.

EVOLUTION DES TEMPERATURES

Le but de cette partie est de suivre l'évolution de la fréquence des situations météorologiques locales rares et très rares entre 2005 et 2009 et de déterminer les types de temps associés à ces situations en 2009, sur le bassin du Bouregreg. Les événements extrêmes sont responsables de phénomènes érosifs intenses, et le changement climatique en cours devrait provoquer un plus grand nombre de situations météorologiques extrêmes dans la région (Driouech *et al.*, 2008). L'étude est effectuée à partir des données journalières de température maximale et minimale, enregistrées entre 2005 et 2009 sur 40 stations du réseau synoptique de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Maroc et traitées par saison et par région en se basant sur 25 régions climatiquement homogènes (Khomsi *et al.*, submitted).

Les situations rares des températures maximales (minimales) sont choisies selon la méthode de la moyenne des maxima (minima). Les situations très rares sont distinguées par la méthode de la moyenne plus/moins deux fois l'écart type, l'étude de leur fréquence est réalisée durant les années 2005 à 2009, alors que l'étude des types de temps associés n'a été réalisée que pour l'année 2009.

L'évolution des températures maximales et minimales est irrégulière et diffère selon la saison et la région. Les événements rares de température maximale de l'été sont plus fréquents en 2005 et 2009, leurs températures s'écartent de la moyenne de la saison de 7,4°C pour l'ensemble du pays. La région de Larache (côte atlantique nord) est la plus touchée par cette hausse et la région d'Essaouira (côte atlantique sud) la moins concernée. Les événements rares de température minimale de l'hiver sont enregistrés pendant les années 2006 et 2008. La région de Sidi Slimane (plaine du Gharb, nord du Maroc) est la plus touchée par la baisse des températures. En ce qui concerne les types de temps, les événements rares de température maximale résultent le plus souvent d'un « temps perturbé de sud-ouest », de « l'axe dorsale sur le Maroc » ou du « front quasi-stationnaire marocain » alors que les événements liés aux températures minimales résultent généralement de « la décharge d'air polaire continental » (Khomsi *et al.*, 2013).

PLUIES

Sur la période 1926-1927 à 2005-2006 entre 4 et 5 stations sont disponibles sur le bassin ou ses environs proches (Rabat-Salé, Kasba-Tadla, Kenitra, Oued Zem et Khouribga). La moyenne interannuelle à ces stations est de 447 mm. Mais pour ne pas donner trop de poids à la région côtière, la station de Kénitra n'est pas utilisée et seule celle de Rabat-Salé sert dans les calculs sur cette période longue. La moyenne est donc de 410 mm par an. L'évolution des pluies annuelles, calculées sur la période de septembre de l'année n à août de l'année $n+1$, est assez variable dans le temps (figure 4), et ne présente pas de rupture nette dans la série, bien que la période de la fin des années 70 voit diminuer les valeurs moyennes interannuelles de façon substantielle et prolongée, sans que cette rupture atteigne toutefois l'ampleur de celle qui est observée ailleurs dans le pays. Sur la série des valeurs moyennes annuelles calculées sur la période 1976-1977 à 1999-2000 à partir d'environ 40 stations chaque année, l'allure al courbe de variation reste globalement identique, mais on constate que souvent les amplitudes sont sensiblement différentes, et surtout un pic beaucoup plus élevé en 1996-1997.

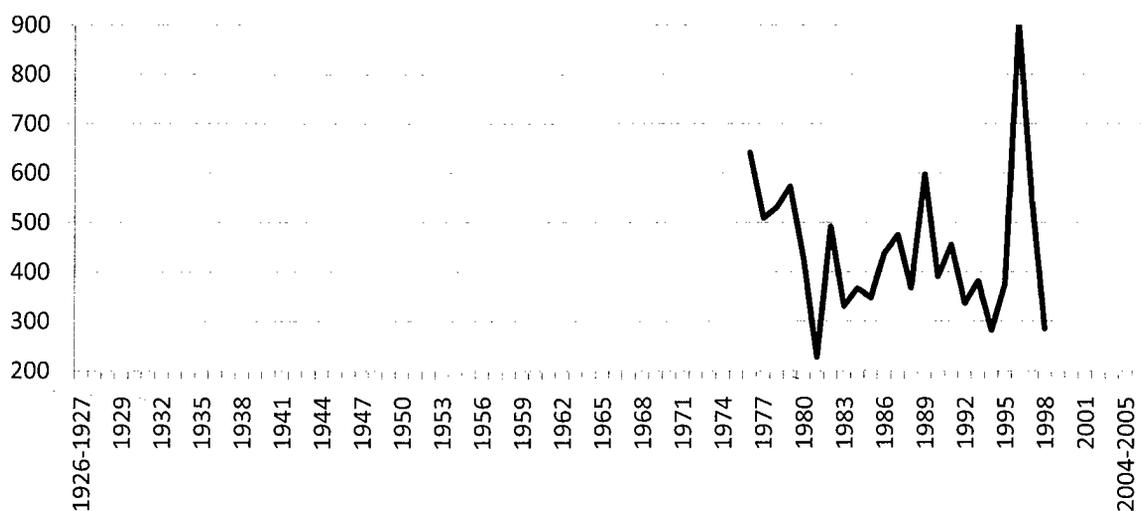


Fig. 4 : Evolution des pluies annuelles sur le bassin du Bouregreg entre 1926-1927 et 2005-2006 (gris) et 1976-1977/1999-2000 (noir)(septembre à août) (mm).

Sur le jeu de données long, mais avec 4 stations seulement pour le calcul, le régime de pluie mensuel est centré sur décembre, avec un pic secondaire vers février-mars. Les mois de juillet-août sont les plus secs (figure 5, bleu). Le calcul avec 40 stations régionales sur un intervalle de temps plus petit fait ressortir une saisonnalité un peu différente, avec un pic de pluie centré sur janvier, et des pluies beaucoup plus fortes en janvier et février, et un peu moins fortes en novembre et décembre..

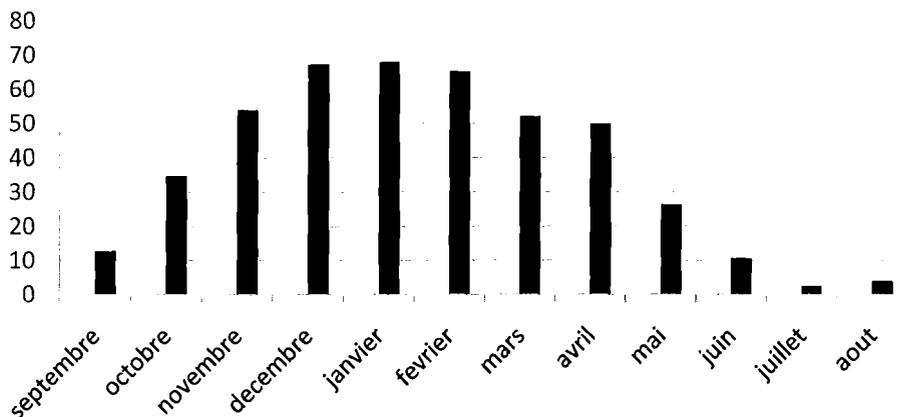


Fig. 5 : Evolution des pluies mensuelles moyennes sur le bassin du Bouregreg entre 1926-1927 et 2005-2006 (gris) et sur la période 1976-1977/1999-2000 (noir) (septembre à août) (mm).

Pour aucun mois on ne constate de rupture nette dans les séries de pluies, bien que le signal interannuel présente un léger affaissement du total annuel.

Il est possible de collecter un beaucoup plus grand nombre de stations sur la période 1976-2000 (environ 40 stations fonctionnelles) qui couvre mieux l'intégralité du bassin du Bouregreg et devrait donc représenter de meilleure manière l'évolution de la pluie sur le bassin en prenant en compte plus finement tous les hétérogénéités locales de la répartition de la pluie. Le graphique correspondant à l'évolution des pluies sur cette période est surimposé à la figure 4.

Selon le nombre de stations utilisées pour étudier les pluies annuelles et mensuelles sur la bassin du Bouregreg le total annuel peut varier de 10% environ, le régime mensuel être sensiblement différent, et l'amplitude de certains signaux annuels être très différente. Cependant l'allure générale de la variabilité reste très proche et il n'y a pas de signe évident de rupture, contrairement à la plupart des autres régions du Maroc (Singla *et al.*, 2010)

DEBITS

Débits liquides

Les débits liquides sont disponibles sur de longues chroniques depuis 1971 jusqu'en 2008 à plusieurs stations dont les deux principales sur l'oued Grou à Sidi Jabeur (3110 km²) et sur l'OUED Bouregreg à Lalla Chafia (3230 km²). Il n'y a pas de station avec de longue chronique sur l'oued Korifla, et il faut noter que la station ancienne de Dar Es Soltane sur le Bouregreg a été noyée suite à la mise en eau du barrage SMBA en 1974.

Sur la figure 6 se trouvent les débits annuels à la station de Sidi Jabeur de 1971-1972 à 2008-2009, calculés sur l'année hydrologique allant de septembre à août (bleu). On note depuis 1981-1982 des débits annuels plus faibles que durant les années 70, mais également un fort maximum en 1996-1997, déjà repéré dans la littérature comme étant une année de forte anomalie NAO favorable à la pluie au Maroc (Khomsi *et al.*, 2012), et également le très fort débit en 2008-2009 correspondant au début d'une courte période de pluies et débits élevés. A la station de Lalla Chafia sur l'oued Bouregreg (rouge) la variabilité est proche de celle de Sidi Jabeur, mais avec quelques différences notables : durant les années 70 le débit à Lalla Chafia est régulièrement beaucoup plus élevé qu'à Sidi Jabeur, sans que l'on puisse trouver une explication, et ensuite en 1990-1991 la différence est de nouveau élevée, peut-être due à un problème de traduction des mesures.

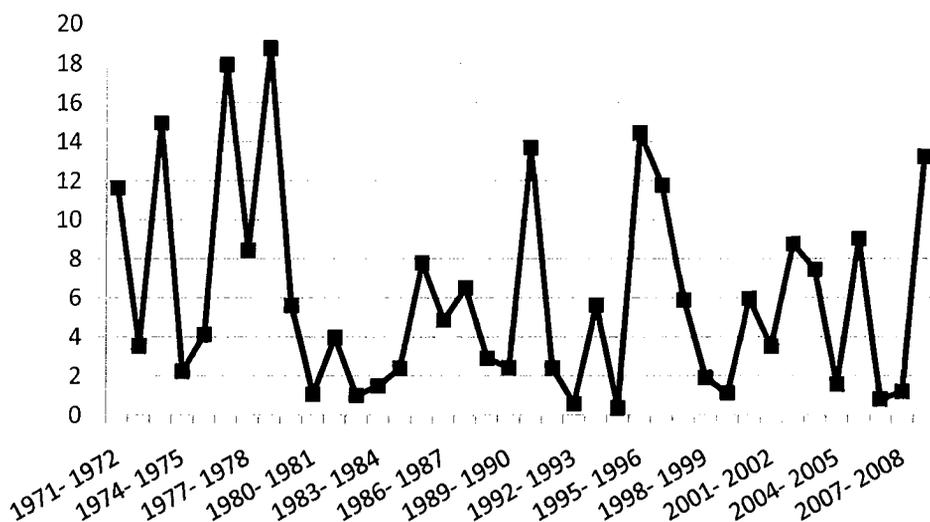


Fig. 6 : Evolution des débits annuels sur le bassin de l'oued Grou à Sidi Jabeur entre 1971-1972 et 2008-2009 (gris) et l'oued Bouregreg à Lalla Chafia (noir) (septembre à août) (m³/s).

A la station de Sidi Jabeur l'écoulement moyen annuel de l'oued Grou est de 4,9 m³/s (155 millions de m³ par an), et celui de l'oued Bouregreg à la station de Lalla Chafia le débit est de 6,1 m³/s pour un volume annuel de 192 millions de m³. Ceci est dû à des pluies un peu plus élevées sur la partie nord du bassin occupée par l'oued Bouregreg.

Les régimes mensuels des deux affluents présentent la même saisonnalité (figure 7), mais un démarrage plus lent sur le nord et l'oued Bouregreg entre septembre et novembre, puis des débits plus forts à Lalla Chafia à partir de décembre, avec un pic plus fort de près de 60% en février. Il est assez difficile d'expliquer simplement cette différence de régime mensuel. On peut tenter de donner quelques premiers éléments qui pourraient être en jeu, comme la plus forte dénudation des états de surface sur le bassin de l'oued Grou, situé plus au sud et plus sec que le bassin du Bouregreg, et donc sans doute susceptible à des ruissellement plus élevés dès le début de la saison des pluies. Ensuite le pic plus élevé en février correspond à des pluies mensuelles plus élevées dans le nord du bassin. Les débits d'étiage très faibles indiquent une très faible réserve souterraine et corrélativement certainement une très faible recharge.

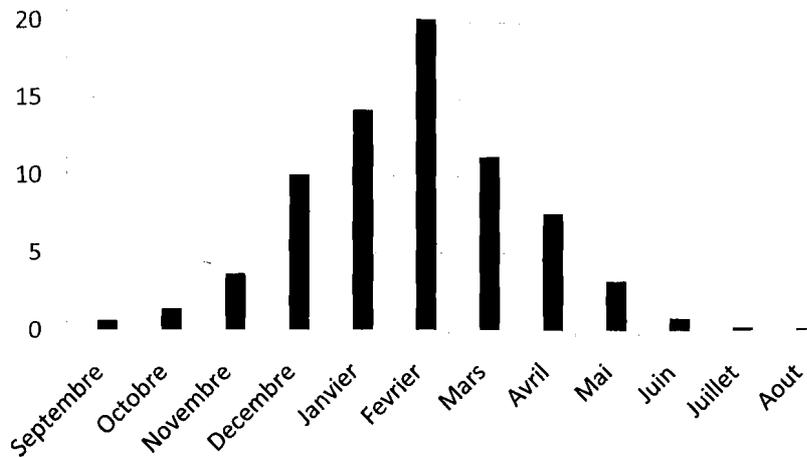


Fig. 7 : Evolution des débits mensuels sur le bassin de l'oued Grou à Sidi Jabeur entre 1971-1972 et 2008-2009 (gris) et l'oued Bouregreg à Lalla Chafia (noir) (septembre à août) (m^3/s).

La surface cumulée des deux oueds étudiés est d'environ 6340 km², soit les deux tiers de la surface totale du bassin à l'embouchure. Si l'on rajoute un tiers de volume écoulé par le reste du bassin (environ 350 millions de m³ par an), au débit non mesuré, on obtient un volume théorique écoulé annuel de près de 530 millions de m³, soit un peu moins que les chiffres moyens que l'on trouve dans la littérature (Marghich, 2004; Lahlou, 1971, par exemple), mais cela peut être due en partie à la période de calcul postérieure à la baisse des pluies au Maroc vers 1979-1980.

Les régimes mensuels sont très différents avant et après la date du changement de régime de pluie interannuel en 1980 (figure 8). Les débits des deux oueds baissent très significativement dès février et jusqu'en mai, avec des pointes de crue beaucoup plus faibles depuis la sécheresse, et avancées d'un mois sur l'oued Grou en janvier au lieu de février. La perte de débit est plus importante sur l'oued Bouregreg que sur l'oued Grou. L'année 2008-2009 a été sortie du calcul car les pluies et les débits ont de nouveau atteint des valeurs élevées, et l'objectif sur la figure 8 est de bien montrer le changement de régime entre les périodes sèches et humides.

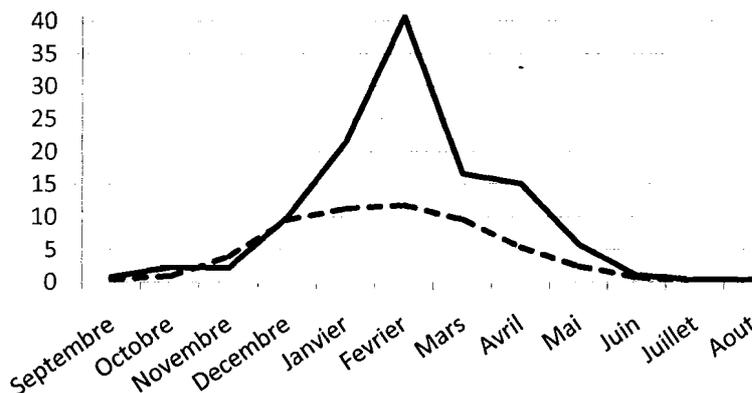


Fig. 8 : Evolution des débits mensuels sur le bassin de l'oued Grou à Sidi Jabeur (gris) et l'oued Bouregreg à Lalla Chafia (noir) (septembre à août) (m^3/s), pour deux périodes : de 1971-72 à 1979-80 (trait plein) et de 1980-81 à 2007-08 (trait pointillé) (m^3/s).

Le régime des pluies mensuelles sur les deux périodes avant et après la sécheresse (figure 9) montre une diminution sensible surtout entre février et avril sur l'ensemble du bassin, bien qu'à l'échelle interannuelle il n'apparaisse pas de signe évident de rupture dans la série. La période de calcul avant sécheresse est différente de celle des débits, car les données disponibles sont plus longues (moyenne des 4 stations de longue durée), mais le résultat est le même qu'avec les 40 stations sur la période plus courte, avec des pluies en février et mars un peu plus élevées sur la période courte 1976-1981. La différence annuelle de pluie entre les deux périodes est de près de 10%.

Pour les débits les signaux de rupture sont un peu plus visibles que pour les pluies (tableau 1) puisqu'on observe des ruptures pour plusieurs mois dès la fin des années 70.

Transports solides

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol. En Algérie, l'ampleur de ce phénomène est considérable. L'agressivité des pluies conjuguées à une absence de protection végétale, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action anthropique, entraînent l'envasement des retenues des barrages (Remini *et al.*, 2009).

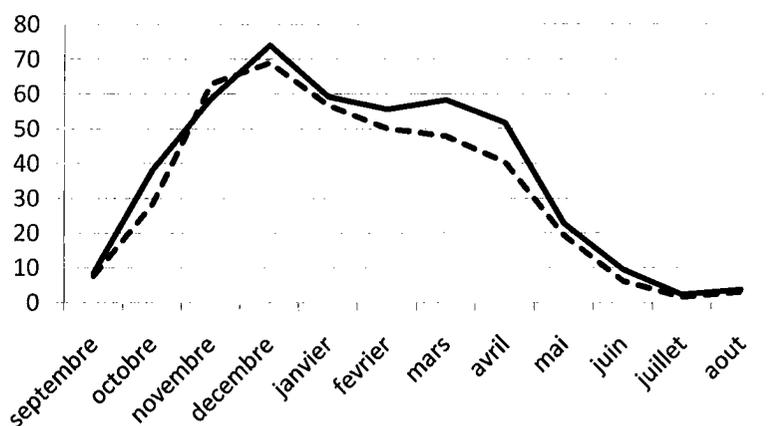


Fig. 9 : Evolution des pluies mensuelles sur le bassin du Bouregreg entre 1926-1927 et 1979-1980 (trait plein) et 1980-81/2005-2006 (tireté)(septembre à août) (mm).

Les données de transport solide sont issues des prélèvements ponctuels irréguliers réalisés par la Direction Nationale de l'Hydraulique sur le Bouregreg. Au Maroc les tonnages exportés peuvent être très élevés dans les oueds de la région nord des montagnes du Rif, avec des valeurs dépassant 5000 t/km².an (Lahlou, 1994). Sur l'oued Bouregreg les mesures ponctuelles de concentration en matières en suspension, effectuées par la Direction de l'Hydraulique, et leur transformation en débits solides, sont décrites par Elbaraka (2011). Contrairement à l'Algérie, peu de mesures existent.

Avant la construction du barrage 2 années de mesures assez complètes ont permis de calculer une érosion spécifique de 185 t/km².an pour le sous-bassin de l'Oued Bouregreg à la station de Dar Es Soltane (3800 km²), noyée depuis par le barrage SMBA (Lahlou, 1971 ; 1986). Les données les plus récentes proviennent de mesures de concentrations effectuées

ponctuellement par la direction de l'hydraulique entre 1978 et 1983. L'absence de suivi régulier des flux solides aux trois affluents majeurs au barrage SMBA, qui constituent le Bouregreg, ne permet pas de donner une valeur précise au taux d'abrasion, mais à partir des valeurs ponctuelles disponibles celui-ci se situe pour chaque affluent autour de 50 t/km².an, soit un ordre de grandeur cohérent avec les mesures de Lahlou.

	Période	Normalité	Buishand	Lee et Heghinian	Pettitt				Segmentation		Conclusion
					99%	95%	90%	Date			
Lalla Chafia	09/1971-08/2009	x	-	-	Oui	Oui	Oui	mai-80	Oui	Fev-79, Mars-79	rupture probable en Mars-1979 confirmée par l'annuel
Sidi Jabeur	09/1971-08/2009	x	-	-	Non	Non	Non	-	Oui	Oct-76, Jan-77, Dec-78, Jan-79, nov-95, Dec-95, nov-08, jan-09	Pas de rupture

Tab. 1 : ruptures probables dans les séries de débits mensuels des deux stations de Lalla Chafia sur l'oued Bouregreg et Sidi Jabeur sur l'oued Grou, selon plusieurs tests statistiques disponibles dans Khronostat (IRD).

Afin de contourner ce problème de suivi aux stations, nous avons étudié les données issues des campagnes bathymétriques. Les volumes d'eau mesurés diminuent entre les relevés bathymétriques de 1985 et de 2009 à la cote de 55 m, d'environ 80 millions de m³ (figure 10).

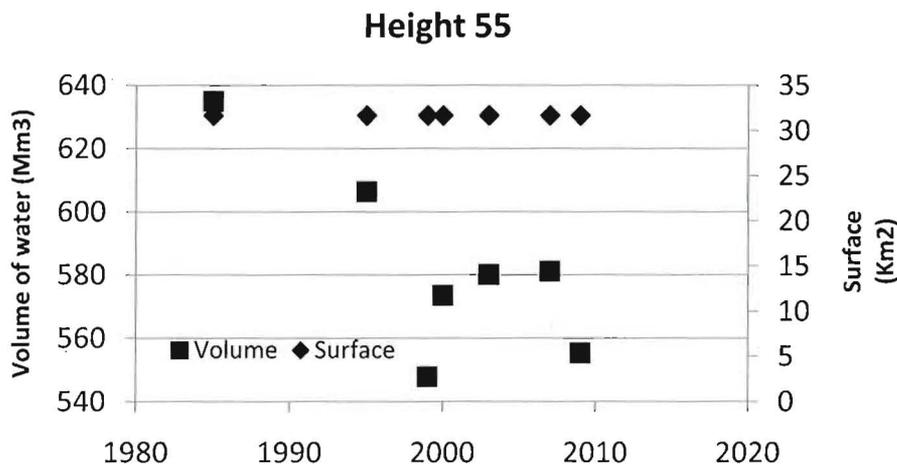


Fig. 10 : Volume d'eau du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah sur le Bouregreg au Maroc entre 1985 et 2009 à la cote 55 m (en millions de m³). La surface ne varie pas, mais le volume d'eau diminue régulièrement (El Baraka, 2011).

Bien que le barrage ait été surélevé en 2006, nous utilisons la cote maximale de 55 m pour pouvoir comparer les hauteurs avant et après rehaussement. Cependant le relevé de 1999 est très douteux, et d'autres incertitudes sont probables. Il faut donc prendre ces résultats au conditionnel. La direction de l'hydraulique recommande de réduire de 20% le volume de vase

pour obtenir un équivalent en matière sèche, soit un total d'environ 66 millions de m³. Le taux d'abrasion sur le bassin du Bouregreg entre 1985 et 2009 est donc d'environ 270 t/km².an, ce qui semble trop élevé par rapport à la valeur donnée par Lahlou pour 1970. Cependant il n'est pas exclu que le taux d'érosion ait fortement augmenté au cours des dernières décennies du fait de l'augmentation de la dégradation des sols.

EROSION

Il ressort de l'étude des transports solides et de l'envasement du barrage une incertitude sur la nature précise des apports en sédiments au barrage : quel est la quantité de matières en suspension (MES) qui transite par chaque affluent ? Quelle est la part de sédiments du barrage provenant des rivières et celle provenant des berges immédiates du barrage ? L'envasement dans le barrage est bien modéré, comparativement à ce qui peut être observé dans d'autres barrages du Maroc, notamment dans le Rif. Mais plusieurs éléments sont à prendre en compte pour ré-estimer l'importance d'étudier plus finement l'envasement de ce barrage. En premier lieu ce barrage alimente en eau potable la grande agglomération de Rabat-Témara-Casablanca, soit un bassin d'environ 8 millions de personnes, dont la consommation en eau ne cesse de croître ; il est donc important de bien évaluer un risque futur de pénurie, s'il existe. Ensuite, en lien avec le premier aspect, la qualité de l'eau du barrage est également un facteur déterminant à suivre. Or on ne connaît pas tout des relations qui peuvent exister entre la nature des MES et la qualité de l'eau ; un changement dans la dynamique et la nature des MES pourrait peut-être entraîner des modifications des équilibres physico-chimiques, et par suite du fonctionnement biologique de la retenue. Enfin, et ce n'est pas la moindre interrogation, l'équipe du CERGéo a bien montré, au cours de nombreuses études (Laouina *et al.*, 2010 ; Machouri et équipe CERGéo, 2012), que les ravinements profonds observés sur de nombreuses berges avaient été réactivés récemment –il y a quelques décennies tout au plus-, entraînant la perte de quantités considérables de terre arable, vers la retenue. Cette dynamique érosive intense à l'œuvre sur les berges du barrage peut-elle menacer rapidement la réserve utile du barrage ? Un manque de quantification de ce phénomène ne permet pas actuellement de statuer sur l'importance de l'apport sédimentaire direct des berges vers la retenue. Le CERGéo a également montré qu'il existe une relation étroite entre l'évolution de l'occupation socio-économique de l'environnement et les processus de ravinement. Il s'agit comme bien souvent, d'une combinaison entre le changement climatique et un changement d'usage des sols et des activités agricoles. Le principe simplifié est le suivant : l'extension de la « grande » agriculture, en partie depuis la colonisation, a modifié l'usage des sols sur les plateaux, diminuant la couverture végétale naturelle vers une plus grande dénudation saisonnière liée aux cultures intensives. Les petites exploitations rurales ont été repoussées vers les seules régions disponibles, les bords de plateau, où l'espace agricole insuffisant a entraîné le développement de l'élevage extensif, en particulier sur les pentes/berges de la retenue du barrage. Quelles ont été les conséquences de ces changements en termes de processus d'écoulement et d'érosion ? L'hypothèse proposée par le CERGéo serait que dans un premier temps sur les plateaux la diminution de la végétation naturelle entraîne une diminution des freins naturels à l'écoulement. Ainsi lors des pluies les écoulements atteignent des vitesses de surface plus élevées. Ces écoulements ont donc un potentiel d'arrachage des particules de sol plus important, qui entraîne une accélération de la dénudation des sols sur les

plateaux. En arrivant sur les hauts de pente, le potentiel érosif des écoulements est donc plus élevé. Dès les premières pentes des berges ceci a pour conséquence d'augmenter également l'érosion sur les hauts de pente. Il faut savoir que le risque d'érosion augmente avec la charge érosive, il y a donc un double effet : l'augmentation de la vitesse d'écoulement et celle de la charge solide s'ajoutent sur le risque érosif. Ces écoulements arrivent sur des pentes occupées depuis plusieurs décennies soit par des zones de cultures, pour les pentes les plus faibles – souvent les hauts de pente d'ailleurs- et par des troupeaux, ce qui fragilise la maigre couverture végétale restante, et de ce fait augmente la susceptibilité à l'érosion des sols sur ces pentes. Les écoulements ainsi formés atteignent des vitesses très élevées et le ravinement se développe très rapidement. Ce mécanisme est amplifié depuis les années 80 par une sécheresse naturelle qui a exercé sur la végétation une pression négative très importante également.

Grâce à la télédétection spatiale il est possible de calculer le risque de dégradation des sols, en suivant une méthode connue (Medalus), qui allie indicateurs anthropiques et physiques (Tra Bi, 2013). Le résultat est une carte du risque de dégradation des terres (Figure 11), qui peut être utile pour la planification.

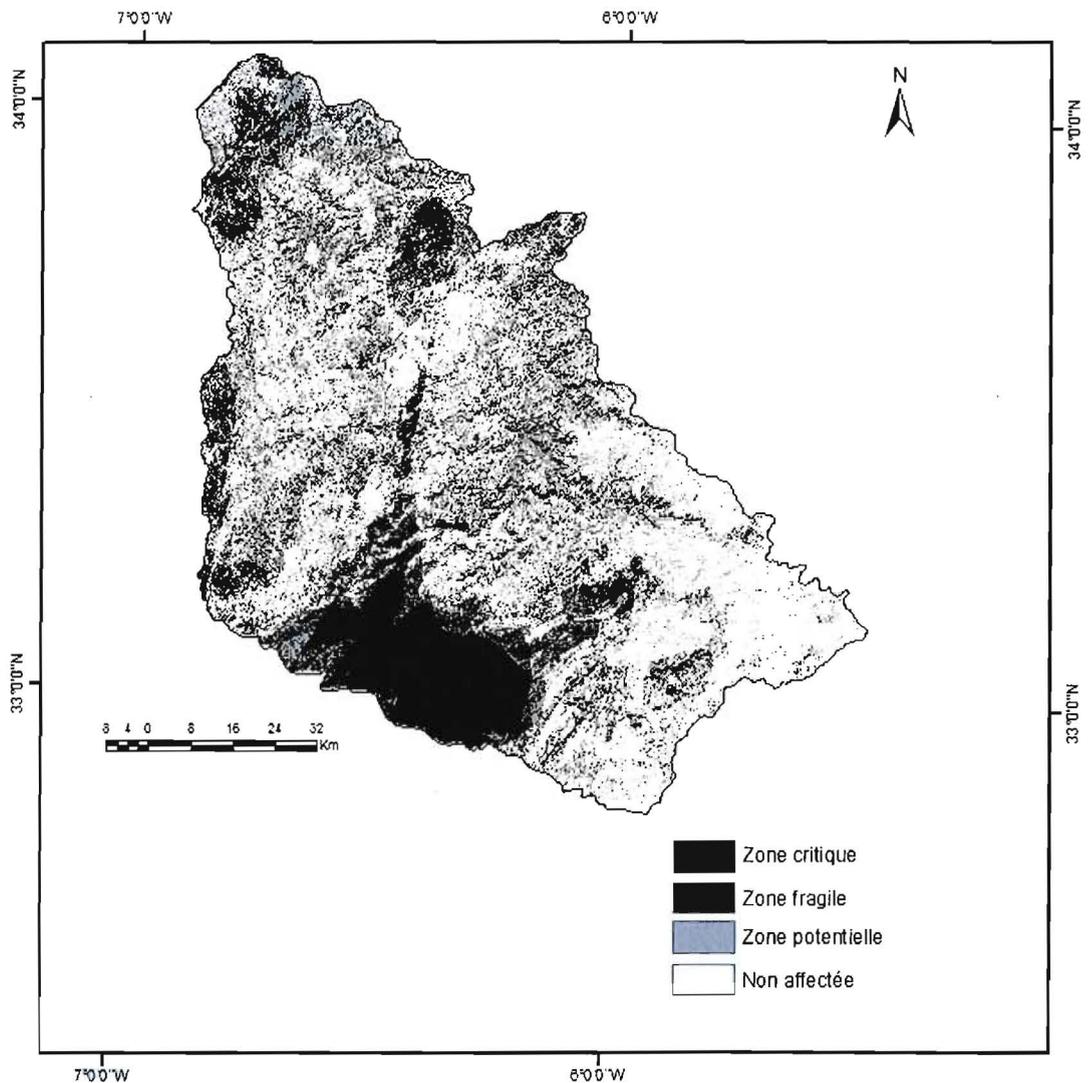


Fig. 11 : Carte de risque de dégradation des terres, selon la méthode Medalus (Tra Bi, 2013).

On connaît donc mieux aujourd'hui certains des mécanismes majeurs à l'œuvre concernant l'érosion et le transport de sédiments vers la retenue du barrage SMBA. Pour autant nous ne connaissons toujours pas les quantités mises en jeu.

CONCLUSION

Les résultats obtenus commencent à être assez nombreux. Les pluies, les débits et les températures sont assez bien connus sur le Bouregreg et ses principaux affluents. Les séries de températures présentent des ruptures faibles mais une modification de la fréquence d'occurrence de certains événements extrêmes chauds et froids, en liaison avec l'apparition plus fréquente ou plus prolongée de certains types de temps caractéristiques. Les séries de pluie annuelles ne varient que peu sur le long terme, mais laissent entrevoir un impact vers une baisse légère du total annuel d'environ 10% à partir de 1980, et jusqu'en 2008-2009. Le régime mensuel a aussi été légèrement modifié avec des pluies un peu plus faibles en février et mars après la sécheresse. L'impact de cette petite baisse des pluies –en comparaison de diminutions plus importantes observées ailleurs au Maroc- est plus important sur les débits annuels qui présentent une rupture en 1979-1980 et un changement de régime mensuel très significatif, traduits par une baisse des débits mensuels de printemps, plus forte au nord qu'au sud.

Depuis 2008-2009 quelques années de meilleure pluviométrie sur le bassin ont entraîné une augmentation des débits également, sans que l'on puisse dire si les événements extrêmes un peu plus fréquents sont significativement plus nombreux.

L'étude des transports solides s'est avérée plus difficile que prévu, car les données ponctuelles disparates de mesures de matières en suspension (MES) ne peuvent pas être aisément traduites en bilan annuel, ni même saisonniers de MES. Les chiffres partiels issus des données collectées indiquent une érosion spécifique entre 150 et 250 t/km².an, ce qui est cohérent avec les mesures du début des années 70 sur le Bouregreg. Les données les plus récentes semblent indiquer une augmentation de cette valeur durant les dernières décennies, ce qui pourrait être relié à une augmentation de la susceptibilité à l'érosion des sols du bassin, sous l'effet conjugué des forçages climatiques et anthropiques. Les données diachroniques de bathymétrie sur le lac de retenue du barrage SMBA présentent également des incertitudes qui ne permettent pas de corroborer avec suffisamment de précision les valeurs ponctuelles de MES.

L'étude des MES depuis les affluents principaux du Bouregreg et une meilleure exploitation des données de bathymétrie pourront permettre ultérieurement de tirer un meilleur profit des données existantes, mais il sera nécessaire de disposer de mesures récentes complémentaires pour affiner les estimations de transports et dépôt de MES.

D'autre part l'érosion en provenance des berges immédiates du barrage SMBA semble avoir nettement augmenté depuis quelques décennies, sans que cela ne soit quantifiable à l'heure actuelle. Pour pouvoir estimer la dynamique à l'œuvre et les quantités mises en jeu, et estimer le risque actuel d'accélération de l'envasement du barrage, une nouvelle approche a été initiée pour calculer les volumes érodés en provenance des ravines des berges immédiates du barrage (Maleval et Crouzevialle, soumis). Cette approche doit être encore développée dans les prochaines années, pour répondre à plusieurs problèmes méthodologiques.

Comment estimer l'érosion en provenance de toutes les ravines le long de toutes les berges – qui représentent au moins 150 km linéaires ? Une approche couplant mesures au sol, typologie, et utilisation d'images satellite haute résolution est envisagée.

Une fois identifiées toutes les ravines, comment savoir quel était la partie du ravinement qui pré-existait à la construction du barrage ? Il y a là un risque de surestimation du volume érodé apporté au barrage. Ce risque peut-être en partie contourné par une meilleure connaissance de la dynamique érosive et des quantités érodées mises en jeu dans les mécanismes érosifs actuels.

Dernier écueil : suite au rehaussement du barrage dans les années 2000, une partie des ravines a été noyée. Elle est donc soustraite aujourd'hui à l'estimation qui pourra être faite des longueurs de ravines mesurées actuellement, et donc cela constitue un facteur de sous-estimation des volumes érodés, qui seront mis en relation avec un volume total érodé dans le barrage prenant compte ces apports précédent le rehaussement. Il faudra donc inventer une technique d'estimation des volumes potentiellement érodés à partir des parties noyées des ravines, à partir par exemple de la hauteur moyenne d'ennoyage.

REMERCIEMENTS

Ce projet est financé par l'AUF-MeRSI 59113PS005 et l'IRD/HydroSciences Montpellier, et a bénéficié de soutiens de l'AIRD, de l'UNESCO (FRIEND), du CRASTE-LF/Rabat, de la DMN et de la DRPE du Maroc, de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia à Ben Slimane, de l'Université Mohamed V-Agdal à Rabat, et des Instituts Français de Rabat, Alger et Tunis.

REFERENCES

- Beaudet, G. (1969) Le plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique. Thèse de Lettres. Imprimerie française, Rabat.
- Driouech, F., Déqué, M. & Mokssit, A. (2008) Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate Dyn.* Springer. DOI 10.1007/s00382-008-0430-6.
- Driouech, F., Déqué, M. & Sanchez-Gomez, E. (2010) Weather Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72, 1-2, 1-10.
- El Baraka, M. (2011) *Etude des transports solides sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)*. Mémoire de Master 2, Hydrosciences Montpellier, Université Montpellier 2.
- Khomsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snoussi, M., Cherifi, R., Nait Said, Z. (2012) Evolution des événements chauds rares et très rares dans les bassins versants du Tensift et du Bouregreg (Maroc) et identification des types de temps synoptiques associés. In: *From prediction to prevention of hydrological risk in Mediterranean countries* (E. Ferrari & P. Versace, Sci. Eds), 4th international Workshop on Hydrological extremes MEDFRIEND group, University of Calabria; EdiBios, Cosenza, Italia; 169-182.
- Khomsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snoussi, M. (2013) Hydro-climatic variability in two Moroccan watersheds: A comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. In: *Climate and land surface changes in hydrology* (E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, K.K. Yilmaz, Eds.), IAHS Publ. 359, 183-190.
- Khomsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snoussi, M. & Trambly, Y. (submitted) Evolution of rare events of extreme temperature in Morocco and related synoptic weather types. *Submitted to Regional and Environmental Change*.
- Khronostat (-) Logiciel de tests statistiques de ruptures dans des séries chronologiques. IRD, France. <http://www.hydrosciences.fr>

- Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Chaker, M., Machmachi, I., Machouri, N. & Sfa, M. (2010) Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres, le cas du secteur Schoul, région atlantique, Maroc. *Sécheresse*, 21, 4, 309-316.
- Lahlou, A. (1971) *Etude du transport solide à la station Dar Es Soltane sur l'oued Bouregreg*. Rapport de travaux du service GDE : gestion des eaux, Ministère des travaux publics et des communications, Direction de l'hydraulique, Rabat, Maroc.
- Lahlou, A. (1986) Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc, *Revue des Science de l'Eau*, 6, 337-356.
- Lahlou, A. (1994) *Envasement des barrages au Maroc*. Editions Wallada, Casablanca, Maroc.
- Machouri, N. et équipe CERGéo (2012) Comment réussir le défi de lutte contre l'érosion des terres et la dégradation des ressources naturelles. Cas des Shouls, plateau du Maroc Atlantique. *Communication à l'atelier scientifique international de Relizane, Algérie*, programme SIGMED, juin 2012.
- Mahe, G., Aderghal, M., AlKarkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Crouzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Rouche, N., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A., Yahiaoui, S., Zerouali, A. (2013a). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: *Considering hydrological change in reservoir planning and management*, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera, G. Mahe, Eds), IAHS Publ. 362, 115-124.
- Mahe, G., Aksoy, H., Brou, Y.T, Meddi, M., Roose, E. (2013b) Relationships between man, environment and sediment transport: a spatial approach. *Revue des Sciences de l'Eau*, 26, 3, 235-244.
- Maleval, V., Crouzevialle, R. (soumis). Les apports sédimentaires directs au lac Sidi Mohammed Ben Abdallah par le biais du réseau ravinatoire (Maroc). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.
- Marghich, A. (2004) *Le bassin versant de Bouregreg (Maroc central) : étude hydrologique, hydrogéologique et hydrochimie des eaux*. Thèse, Université Sidi Mohammed ben Abdellah, Fès, Maroc.
- Remini, B., Leduc, C. & Hallouche, W. (2009). Évolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse*. 20, 1, 96-103
- Singla, S., Mahé, G., Dieulin, C., Driouech, F., Milano, M., El Guelai, F.Z. & Ardoin-Bardin, S. (2010) Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), IAHS Publ. 340, 679-687.
- Tra Bi, A.Z. (2013) *Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)*. Thèse de l'Université d'Artois à Arras (France) et de l'Université Houphouët Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire).